

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 101 15 509.3  
**Anmeldetag:** 29. März 2001  
**Anmelder/Inhaber:** Leica Microsystems Heidelberg GmbH,  
68165 Mannheim/DE  
**Bezeichnung:** Anordnung zum Untersuchen mikroskopischer  
Präparate mit einem Scanmikroskop und  
Beleuchtungseinrichtung für ein Scanmikroskop  
**Priorität:** 17. Juni 2000 DE 100 30 013.8  
**IPC:** G 02 B, G 02 F

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 14. Juni 2004  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
Im Auftrag



Werner

Anordnung zum Untersuchen mikroskopischer Präparate mit einem Scanmikroskop und Beleuchtungseinrichtung für ein Scanmikroskop

Die Erfindung betrifft eine Anordnung zum Untersuchen mikroskopischer Präparate mit einem Scanmikroskop. Im Besonderen betrifft die Erfindung  
5 eine Anordnung zum Untersuchen mikroskopischer Präparate mit einem Scanmikroskop, das einen Laser und ein optisches Mittel umfasst, das das von dem Laser erzeugte Licht auf eine zu untersuchende Probe abbildet. Das Scanmikroskop kann auch als konfokales Mikroskop ausgestaltet sein.

Des Weiteren betrifft die Erfindung eine Beleuchtungseinrichtung für ein  
10 Scanmikroskop.

In der Scanmikroskopie wird eine Probe mit einem Lichtstrahl abgerastert. Hierzu werden oft Laser als Lichtquelle eingesetzt. Aus der EP 0 495 930: „Konfokales Mikroskopsystem für Mehrfarbenfluoreszenz“ ist beispielsweise ein Anordnung mit einem einzelnen, mehrere Laserlinien emittierenden Laser  
15 bekannt. Derzeit werden hierfür meist Mischgaslaser, insbesondere ArKr-Laser, eingesetzt.

Im Einsatz sind auch Diodenlaser und Festkörperlaser.  
Aus der Patentschrift US-A-5,161,053 mit dem Titel „Confocal Microscope“ ist ein konfokales Mikroskop bekannt, bei dem Licht einer externen Lichtquelle  
20 mit Hilfe einer Glasfaser zum Strahlengang des Mikroskops transportiert wird und das Ende der Glasfaser als Punktlichtquelle dient, so dass eine mechanische Blende überflüssig wird.

Das Emissionsspektrum von Lasern ist auf einen schmalen Wellenlängenbereich eingegrenzt, so dass zur simultanen Mehrlinienanregung  
25 das Licht mehrerer Laser zu einem Beleuchtungsstrahl vereinigt werden muss.

Die als Mehrlinienlaser meist eingesetzten Gaslaser sind sehr aufwendig und teuer. Darüber hinaus sind sie sehr wartungsbedürftig, was den Dauereinsatz bei vielen mikroskopischen Anwendungen erschwert.

- Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Scanmikroskop zu schaffen,
- 5 das die Probenuntersuchung mit mehreren spektralen Linien ermöglicht, ohne dabei auf den Einsatz vom Mehrlinienlaser angewiesen zu sein.

Die objektive Aufgabe wird gelöst durch eine Anordnung, die dadurch gekennzeichnet ist, dass zwischen dem Laser und dem optischen Mittel ein optisches Bauelement vorgesehen ist, das das vom Laser erzeugte Licht bei

10 einmaligem Durchlauf spektral verbreitert.

Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, eine Beleuchtungseinrichtung für ein Scanmikroskop zu schaffen, die weitere spektrale Bereiche zugänglich macht, die bisher nicht adressierbar waren.

Die objektive Aufgabe wird gelöst durch eine Beleuchtungseinrichtung, die dadurch gekennzeichnet ist, dass an der Lichtaustrittsöffnung ein optisches Bauelement angebracht ist, das aus photonic-band-gap-material besteht.

Das optische Bauelement in der Form eines „photonic-band-gap-material“ hat den Vorteil, dass durch den optisch nichtlinearen Aufbau der Faser ein kurzer Laserimpuls verbreitert wird und somit ein spektral breites, kontinuierliches Lichtspektrum entsteht. Bei „Photonic-band-gap-material“ handelt es sich um mikrostrukturiertes durchsichtiges Material. Meist durch Zusammenfügen von verschiedenen Dielektrika lässt sich dem resultierenden Kristall eine Bandstruktur für Photonen aufprägen, die an die elektronische Bandstruktur von Halbleitern erinnert.

20

25

30

Die Technik wird neuerdings auch bei Lichtleitfasern verwirklicht. Die Fasern werden durch Ausziehen von strukturiert angeordneten Glasrohren hergestellt. Den Fasern liegt eine besondere Struktur zugrunde: In Faserrichtung sind kleine Kanülen frei gelassen, die einen Abstand von etwa 2-3 µm und einen Durchmesser von ca. 1 µm haben und meist mit Luft gefüllt sind. In der Mitte der Faser liegt keine Kanüle vor. Diese Art von Fasern sind als "photon crystal fibres", „holey fibers“ oder „microstructured fibers“ bekannt.

"Photon crystal fibres" können für die Erzeugung einer kontinuierlichen spektralen Verteilung über den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich eingesetzt werden. Hierzu wird das Licht eines Kurzpulselasers in die Faser eingekoppelt. Durch den optisch nichtlinearen Aufbau der Faser verbreitert

- 5 sich das Frequenzspektrum des Lasers. Es entsteht ein spektral breites, kontinuierliches Lichtspektrum.

Das optische Bauelement ist in einer bevorzugten Ausgestaltung des Scannmikroskops aus einer Vielzahl von mikrooptischen Strukturelementen aufgebaut, die zumindest zwei unterschiedliche optische Dichten aufweisen.

- 10 Ganz besonders bevorzugt ist eine Ausgestaltung, bei der das optische Element einen ersten Bereich und einen zweiten Bereich beinhaltet, wobei der erste Bereich eine homogene Struktur aufweist und in dem zweiten Bereich eine mikroskopische Struktur aus mikrooptischen Strukturelementen gebildet ist. Von Vorteil ist es außerdem, wenn der erste Bereich den zweiten Bereich 15 umschließt. Die mikrooptischen Strukturelemente sind vorzugsweise Kanülen, Stege, Waben, Röhren oder Hohlräume.

Das optische Bauelement besteht in einer anderen Ausgestaltung aus nebeneinander angeordnetem Glas- oder Kunststoffmaterial und Hohlräumen. Besonders zu bevorzugen ist die Ausführungsvariante, bei der das optische

- 20 Bauelement aus Photonic-Band-Gap-Material besteht und als Lichtleitfaser ausgestaltet, wobei vorzugsweise eine optische Diode vorgesehen ist, die eine Rückreflexion des Lichtstrahles unterdrückt des Lasers an den Enden der Lichtleitfaser

Eine ganz besonders bevorzugte und einfach zu realisierende

- 25 Ausführungsvariante beinhaltet als optisches Bauelement eine herkömmliche Lichtleitfaser mit einem Faserkern, die zumindest entlang eines Teilstücks eine Verjüngung aufweist. Lichtleitfasern dieser Art sind als sog. „tapered fibers“ bekannt. Vorzugsweise ist die Lichtleitfaser insgesamt 1 m lang und weist eine Verjüngung auf einer Länge von 30 mm bis 90 mm auf. Der 30 Durchmesser der Faser beträgt in einer bevorzugten Ausgestaltung 150 µm außerhalb des Bereich der Verjüngung und der des Faserkerns in diesem Bereich ca. 8 µm. Im Bereich der Verjüngung ist der Durchmesser der Faser

auf ca. 2 µm reduziert. Der Faserkern Durchmesser liegt entsprechend im Nanometerbereich.

Zum Einsatz in der Mikroskopie ist es wichtig, Mittel zur Wellenlängenauswahl und zur Lichtleistungsstabilisierung zu implementieren. Daher lässt sich in

- 5 vorteilhafter Weise ein solcher Faserlaser mit akusto- oder elektrooptischen, einstellbaren Filtern (AOTF), mit akusto- oder elektrooptischen Deflektoren (AOD), akusto- oder elektrooptischen Strahlteilern (AOBS) kombinieren. Diese können zum einen zur Wellenlängenauswahl als auch zur Ausblendung des Detektionslichtes verwendet werden (unsere deutsche Anmeldung DE 199 06
- 10 757 A1: „Optische Anordnung“).

Insbesondere in der konfokalen Mikroskopie lässt sich das Faseraustrittsende als Punktlichtquelle nutzen, wodurch die Verwendung einer Anregungsblende überflüssig wird. Bei einer solchen Ausgestaltung wäre es von besonderem Vorteil, das Faserende selbst teilreflektierend zu beschichten, so dass dieser

- 15 Teilreflektor einen Resonatorenspiegel bildet.

In weiteren Ausführungsformen sind Vorrichtungen zur Kompensation von Lichtleistungsschwankungen vorgesehen. Beispielsweise kann eine

Regelschleife zur Lichtleistungsstabilisierung eingebaut werden, die parasitär die Lichtleistung im Strahlengang des Mikroskops misst und beispielsweise

- 20 durch Variation der Pumplichtleistung oder mit Hilfe eines akusto- oder elektrooptischen Elements die Probenbeleuchtungslichtleistung konstant hält. Zu diesem Zweck könnten auch LCD-Abschwächer verwendet werden.

Ein weiterer Vorteil der Erfindung ist, wenn die Beleuchtungeeinrichtung bereits entsprechend gestaltet ist, dass sie mehrere spektrale Bereiche zur

- 25 Beleuchtung liefert. Der Laser, der die Beleuchtungseinrichtung für ein Scanmikroskop darstellt, hat an der Lichtaustrittsöffnung ein optisches Bauelement befestigt. Das optische Bauelement besteht aus photonic-band-gap-material. Ferner kann das photonic-band-gap-material als Lichtleitfaser ausgestaltet sein.

- 30 In der Zeichnung ist der Erfindungsgegenstand schematisch dargestellt und wird anhand der Figuren nachfolgend beschrieben. Dabei zeigen:

- Fig. 1 eine erfindungsgemäße Anordnung mit einem Konfokalmikroskop,
- Fig. 2 eine Anordnung, bei der auf ein Beleuchtungsspinhole verzichtet wurde,
- 5 Fig. 3 eine Anordnung mit Lichtleistungsstabilisierung,
- Fig. 4 eine Ausführung des optischen Bauelements
- Fig. 5 eine weitere Ausführung des optischen Bauelements.
- Fig. 1 zeigt ein Konfokalmikroskop, das ein optisches Bauelement 3 zur Aufweitung eines von einem Pulslaser 1 erzeugten Laserimpulses verwendet.
- 10 Der Pulslaser 1 definiert einen gepulsten Laserstrahl 2, der durch das optische Bauelement 3 geleitet wird. Das optische Bauelement 3 ist ein „photonic-band-gap-material. Aus dem optischen Bauelement 3 tritt ein spektral breitbandiges Beleuchtungslicht 4 aus, das von einer ersten Optik 5 auf ein Beleuchtungsspinhole 6 abgebildet wird und dann auf einen Strahlteiler 7 trifft.
- 15 Vom Strahlteiler 7 gelangt das spektral breitbandige Beleuchtungslicht 4 zu einer zweiten Optik 8, die einen parallelen Lichtstrahl 4a erzeugt, der auf einen Scanspiegel 9 trifft. Dem Scanspiegel 9 sind mehrere Optiken 10 und 11 nachgeschaltet, die den Lichtstrahl 4a formen. Der Lichtstrahl 4a gelangt zu einem Objektiv 12, von dem er auf eine Probe 13 abgebildet wird. Das von der
- 20 Probe reflektierte oder ausgesendete Licht definiert einen Beobachtungsstrahlengang 4b. Das Licht des Beobachtungsstrahlengang 4b tritt abermals durch die zweite Optik 8 und wird auf ein Detektionsspinhole 14 abgebildet, das vor einem Detektor 15 sitzt. Durch das optische Bauelement 3 ist es möglich, das für die Untersuchung der Probe 13 notwendige Laserlicht
- 25 entsprechend dem gewünschten Spektrum zu erzeugen.

Das in Fig. 2 dargestellte Ausführungsbeispiel zeigt ein Konfokalmikroskop, bei dem auf das Beleuchtungsspinhole 6 verzichtet wurde. Alle Elemente, die mit den Elementen aus Fig. 1 übereinstimmen, sind mit dem gleichen Bezugszeichen bezeichnet. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist an Stelle der ersten Optik 5 ein AOTF 16 (acousto optical tunable filter) eingesetzt, der mit einer entsprechenden AOTF-Ansteuerung 17 verbunden ist. Da das optische

Bauelement 3 ein breitbandiges Beleuchtungslicht 4 erzeugen kann, ist es notwendig, Mittel zur Wellenlängenauswahl und Lichtleistungsstabilisierung vorzusehen. In vorteilhafter Weise kann man akusto- oder elektrooptisch einstellbare Filter (AOTF) mit akusto- oder elektrooptischen Defektoren (AOD)

5 und akusto- oder elektrooptischen Strahlteilern (AOBS) kombinieren. Diese können zum einen zur Wellenlängenauswahl als auch zur Ausblendung des Detektionslichtes verwendet werden. Dem AOTF 16 ist ferner ein Strahlumpf 18 zugeordnet, der die nicht verwendeten spektralen Anteile der Beleuchtungslicht fängt, um unnötige Störungen des Scanmikroskops zu

10 vermeiden.

Eine weitere Ausführungsform der Erfindung ist in Fig. 3 dargestellt. Hier ist an Stelle des optischen Bauelements 3 eine Lichtleitfaser 20 verwendet, die aus dem photonic-band-gap-material besteht. Vom Pluslaser 1 wird der gepulste Laserstrahl 2 über eine Optik 19 in ein Eintrittsende 20a der Lichtleitfaser 20 eingekoppelt. Da die Lichtleitfaser 20 aus dem photonic-band-gap-material aufgebaut ist, tritt aus einem Austrittsende 20b ein spektral verbreiterter Laserimpuls aus, der über eine Optik 21 ausgekoppelt wird. Bevor der spektral verbreiterte Laserimpuls auf das Beleuchtungsspinhole 6 trifft, wird eine spektrale Filterung vorgenommen. Dazu sind mehrere Farbfilter 24 auf 15 einem Revolver 23 angeordnet. Über einen Motor 22 ist der Revolver 23 drehbar, so dass die entsprechenden Farbfilter 24 in den Strahlengang eingebracht werden können. Ebenso ist eine lineare Anordnung der Farbfilter 24 denkbar, dabei werden die Farbfilter 24 mittels einer Linearbewegung in 20 einen Beleuchtungsstrahlengang 50 verfahren. Der Beleuchtungsstrahlengang 25 50 nach dem Beleuchtungsspinhole 6 ist mit dem Strahlengang aus Fig. 1 vergleichbar. Wie bereits in Fig. 1 erwähnt, lenkt der Strahlteiler 7 das Licht auf den Scanspiegel 9. Ein Teil des Licht tritt durch den Strahlteiler 7 hindurch und definiert einen Verluststrahlengang 50a. Dieser Anteil des Lichts ist für 25 die Beobachtung oder Messung verloren. Aus diesem Grunde ist im Verluststrahlengang 50a ein Detektor 25 vorgesehen, der das Verlustlicht bestimmt und daraus eine elektronische Größe ermittelt, die mittels einer Leitung 30 an eine Regelungselektronik 26 geleitet wird. Die 30 Regelungselektronik 26 ist über eine weitere Leitung 32 mit dem Pulslaser 1

verbunden. Über die Leitung 32 regelt die Regelungselektronik 26 die Intensität des Pulslasers 1 in der Weise, dass an der Probe 13 immer eine konstante Lichtleistung auftrifft. Beispielsweise kann eine Regelschleife zur Lichtleistungsstabilisierung derart vorgesehen sein, dass sie parasitär die

5. Lichtleistung im Strahlengang des Mikroskops misst und beispielsweise durch Variation der Pumplichtleistung oder mit Hilfe eines akusto- oder elektrooptischen Elements die Probenbeleuchtungslichtleistung konstant hält. Zu diesem Zweck könnten auch LCD-Abschwächer verwendet werden.

Fig. 4 zeigt schematisch eine Ausführung des optischen Bauelements 3. In  
10 dieser Ausführung besteht das optische Bauelement 3 aus einer herkömmlichen Lichtleitfaser 51 mit einem Außendurchmesser von 125 µm und einem Faserkern 52, der einen Durchmesser von 6 µm aufweist. Im Bereich einer 300 mm langen Verjüngung 53 ist der Aussendurchmesser der Lichtleitfaser 51 auf 1,8 µm reduziert. In diesem Bereich beträgt der  
15 Durchmesser des Faserkerns 52 nur noch Bruchteile von Mikrometern.

Fig. 5 zeigt eine Ausführung des optischen Bauelements 3. Dieses besteht aus Photonic-Band-Gap-Material, die eine besondere wabenförmige Mikrostruktur 54 aufweist. Die gezeigte Wabenstruktur ist für die Generierung von breitbandigem Licht besonders geeignet. Der Durchmesser der inneren  
20 Kanüle 55 beträgt ca. 1,9 µm. Die innere Kanüle 55 ist von Glassteegen 56 umgeben. Die Glasstege 56 formen wabenförmige Hohlräume 57. Diese mikrooptischen Strukturelemente bilden gemeinsam einen zweiten Bereich 58, der von einem ersten Bereich 59, der Glasmantel ausgeführt ist, umgeben ist.

Die Erfindung wurde in Bezug auf eine besondere Ausführungsform  
25 beschrieben. Es ist jedoch selbstverständlich, dass Änderungen und Abwandlungen durchgeführt werden können, ohne dabei den Schutzbereich der nachstehenden Ansprüche zu verlassen.

**Bezugszeichenliste**

- 1 Pulslaser
- 2 Gepulster Laserstrahl
- 5 3 optisches Bauelement
- 4 Spektral breitbandiges Beleuchtungslicht
- 4a Lichtstrahl
- 4b Beobachtungsstrahlengang
- 5 Optik
- 10 6 Beleuchtungsspinhole
- 7 Strahlteiler
- 8 Optik
- 9 Scanspiegel
- 10 Optik
- 15 11 Optik
- 12 Objektiv
- 13 Probe
- 14 Detektionspinhole
- 15 Detektor
- 20 16 AOTF (acousto optical tunable filter)
- 17 AOTF-Ansteuerung
- 18 Strahlumpf
- 19 Optik
- 20 photonic-band-gap-Lichtleitfaser
- 25 20a Eintrittsende
- 20b Austrittsende
- 21 Optik
- 22 Motor
- 23 Revolver
- 30 24 Farbfilter
- 25 Detektor
- 26 Regelungselektronik
- 30 Leitung
- 32 Leitung

- 50 Beleuchtungsstrahlengang
- 50a Verluststrahlengang
- 51 Lichtleitfaser
- 52 Faserkern
- 5 53 Verjüngung
- 54 Mikrostruktur
- 55 Kanüle
- 56 Glasstege
- 57 Hohlräume
- 10 58 zweiter Bereich
- 59 erster Bereich

Patentansprüche

1. Anordnung zum Untersuchen mikroskopischer Präparate mit einem Scanmikroskop, das einen Laser (1) und ein optisches Mittel (12) umfasst, das das von dem Laser (1) erzeugte Licht auf eine zu untersuchende

5 Probe (13) abbildet, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen dem Laser (1) und dem optischen Mittel (12) ein optisches Bauelement (3, 20) vorgesehen ist, das das vom Laser (1) erzeugte Licht bei einmaligem Durchlauf spektral verbreitert.

2. Scanmikroskop nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Bauelement (3, 20) aus photonic-band-gap-material besteht.

3. Scanmikroskop nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das photonic-band-gap-material als Lichtleitfaser (20) ausgestaltet ist.

15 4. Scanmikroskop nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Bauelement (3, 20) als Lichtleitfaser (23) ausgeführt ist, die eine Verjüngung (53) aufweist.

5. Scanmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Laser (1) ein Pulslaser ist.

20 6. Scanmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass dem optischen Bauelement (3, 20) Mittel (16, 18 und/oder 23, 24) zum Abschwächen und/oder Ausblenden des Lichtes mindestens einer Wellenlänge oder mindestens eines Wellenlängenbereichs nachgeordnet sind.

25 7. Scanmikroskop nach Anspruch 5, **dadurch**

**gekennzeichnet**, dass zum Abschwächen und/oder Ausblenden des Lichtes mindestens ein spektral selektiver Filter (24) vorgesehen ist.

8. Scanmikroskop nach Anspruch 7, **dadurch**  
**gekennzeichnet**, dass der Filter ein dichroitischer Filter (24) ist.
- 5 9. Scanmikroskop nach Anspruch 6, **dadurch**  
**gekennzeichnet**, dass zum Abschwächen und/oder Ausblenden des Lichtes ein akustooptischer Filter (16) (AOTF: acousto optical tunable filter) vorgesehen ist.
- 10 10. Scanmikroskop nach Anspruch 6, **dadurch**  
**gekennzeichnet**, dass zum Abschwächen und/oder Ausblenden des Lichtes ein akustooptischer Deflektor (AOD: acousto optical deflector) vorgesehen ist.
11. Scanmikroskop nach Anspruch 6, **dadurch**  
**gekennzeichnet**, dass zum Abschwächen und/oder Ausblenden des Lichtes ein LCD-Abschwächer vorgesehen ist.
- 15 12. Scanmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 6,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass Mittel (25, 26) zur Lichtleistungsstabilisierung vorgesehen sind.
13. Scanmikroskop nach Anspruch 12, **dadurch**  
**gekennzeichnet**, dass zur Lichtleistungsstabilisierung ein Regelkreis vorgesehen ist.
- 20 14. Scanmikroskop nach einem der vorherigen Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass das Scanmikroskop ein Konfokalmikroskop ist.
15. Scanmikroskop nach Anspruch 14, **dadurch**  
25 **gekennzeichnet**, dass das Austrittsende (20b) der Lichtleitfaser (20) als Beleuchtungsblende dient.
16. Beleuchtungseinrichtung für ein Scanmikroskop mit einem Laser (1), der eine Lichtaustrittsöffnung umfasst, **dadurch gekennzeichnet**, dass an der Lichtaustrittsöffnung ein optisches Bauelement (3, 20) angebracht 30 ist, das aus photonic-band-gap-material besteht.

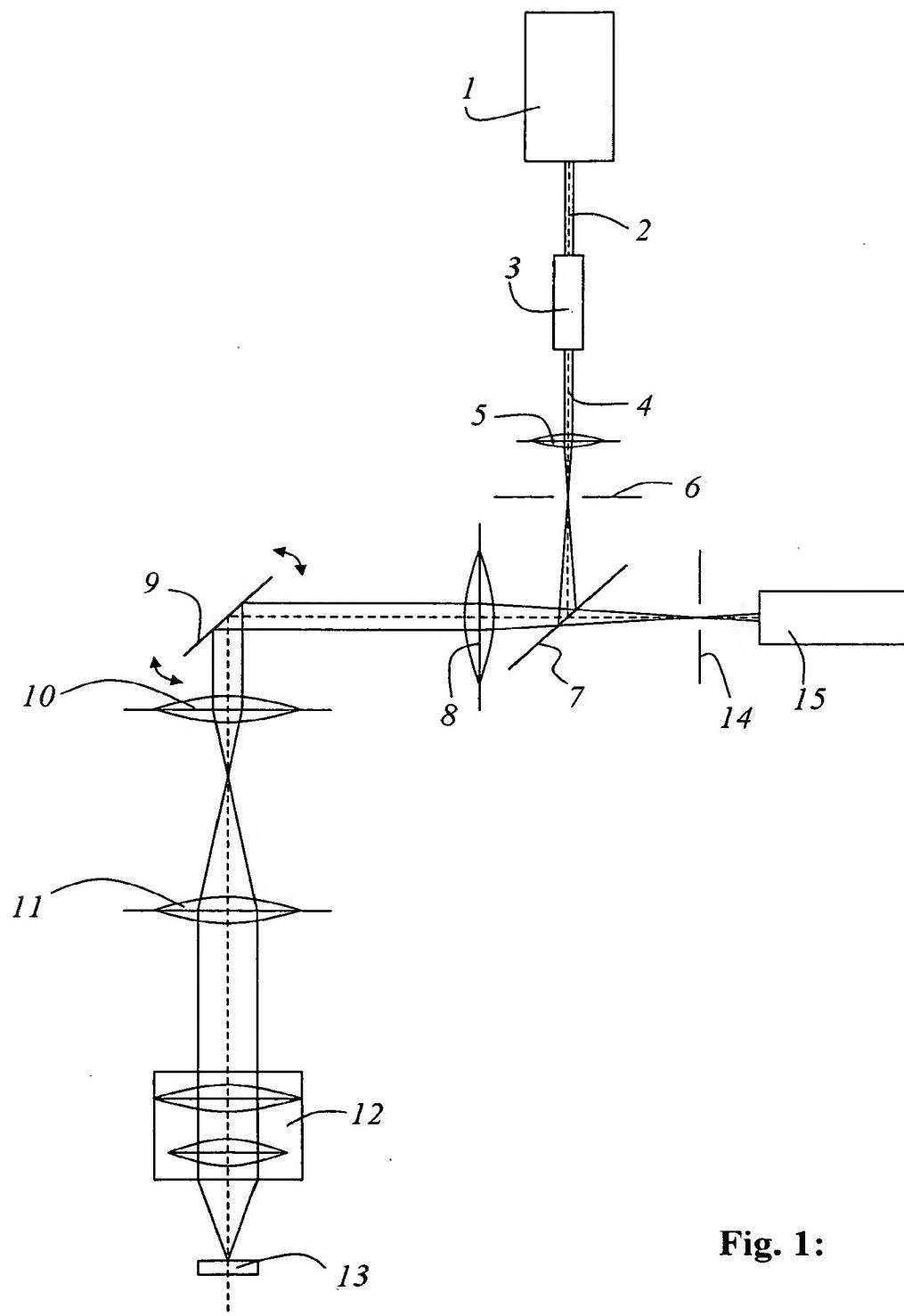
17. Beleuchtungseinrichtung nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass das photonic-band-gap-material als Lichtleitfaser (20) ausgestaltet ist.
18. Beleuchtungseinrichtung nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optisches Bauelement (3, 20) als Lichtleitfaser (20) ausgestaltet ist und eine Verjüngung aufweist.
19. Beleuchtungseinrichtung nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Austrittsende (20b) der Lichtleitfaser (20) als Beleuchtungsblende dient.
- 10 20. Beleuchtungseinrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Laser (1) ein Pulslaser ist.

Zusammenfassung

Die Anordnung zum Untersuchen mikroskopischer Präparate mit einem Scanmikroskop besteht aus einem Laser (1) und einem optischen Mittel (12), das das von dem Laser (1) erzeugte Licht auf eine zu untersuchende Probe 5 abbildet. Zwischen dem Laser (1) und dem optischen Mittel (12) ist ein optisches Bauelement (3, 20) vorgesehen, das das vom Laser (1) erzeugte Licht bei einmaligem Durchlauf spektral verbreitert. Das optische Bauelement (3, 20) besteht aus photonic-band-gap-material. Besonders vorteilhaft ist es, wenn das photonic-band-gap-material als Lichtleitfaser (20) ausgestaltet ist.

10

Fig. 1



**Fig. 1:**

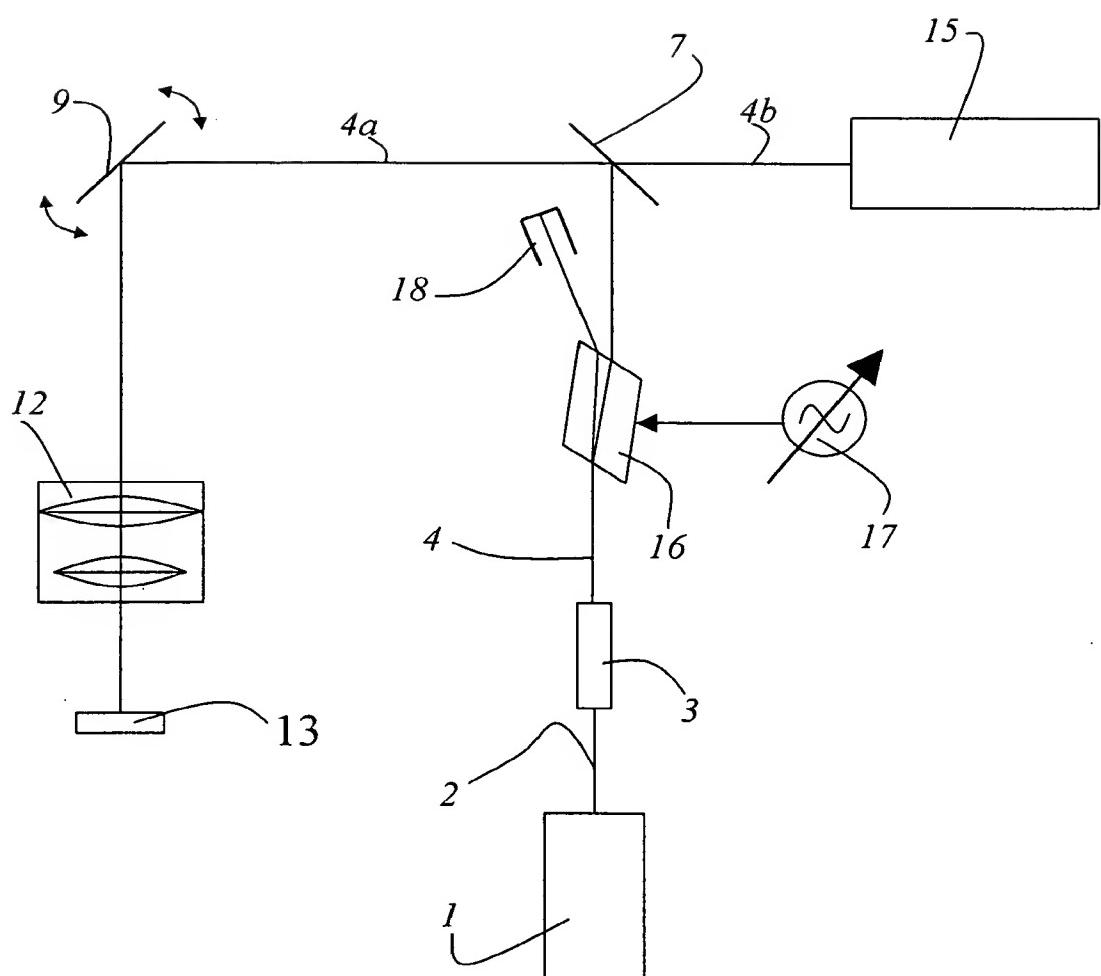
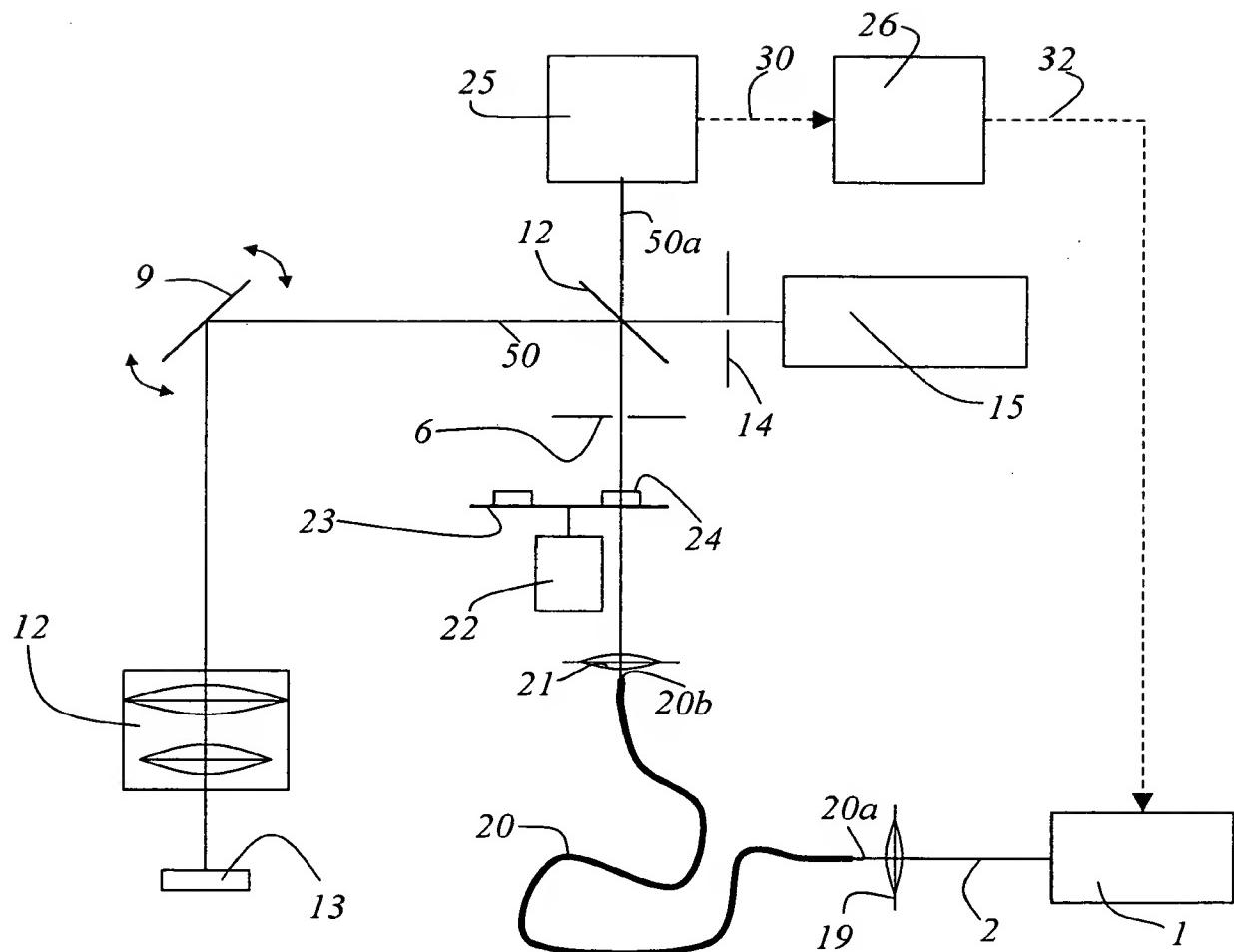
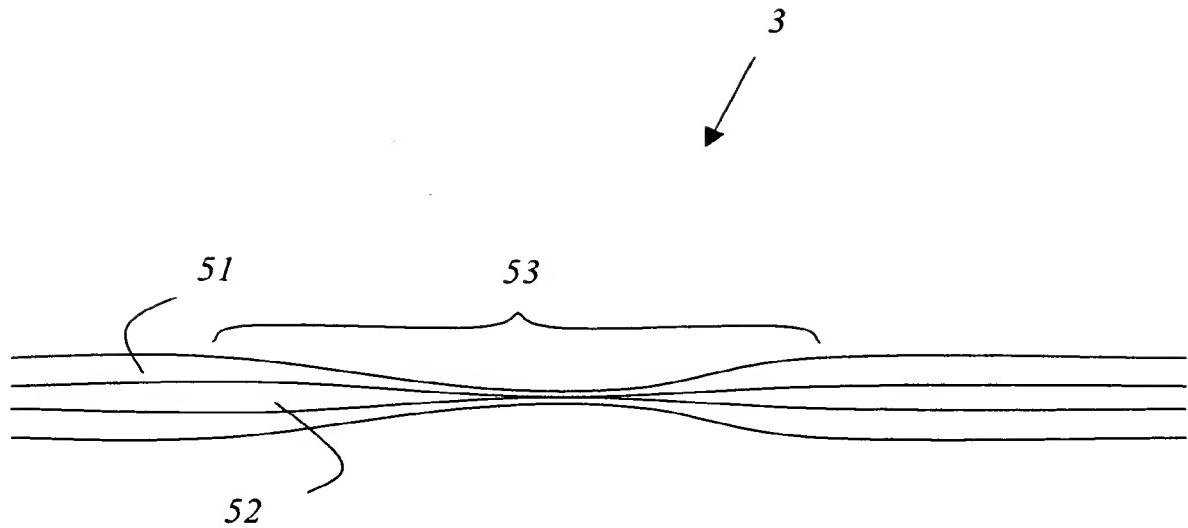


Fig. 2:



**Fig. 3:**

4/5



**Fig. 4:**

5/5

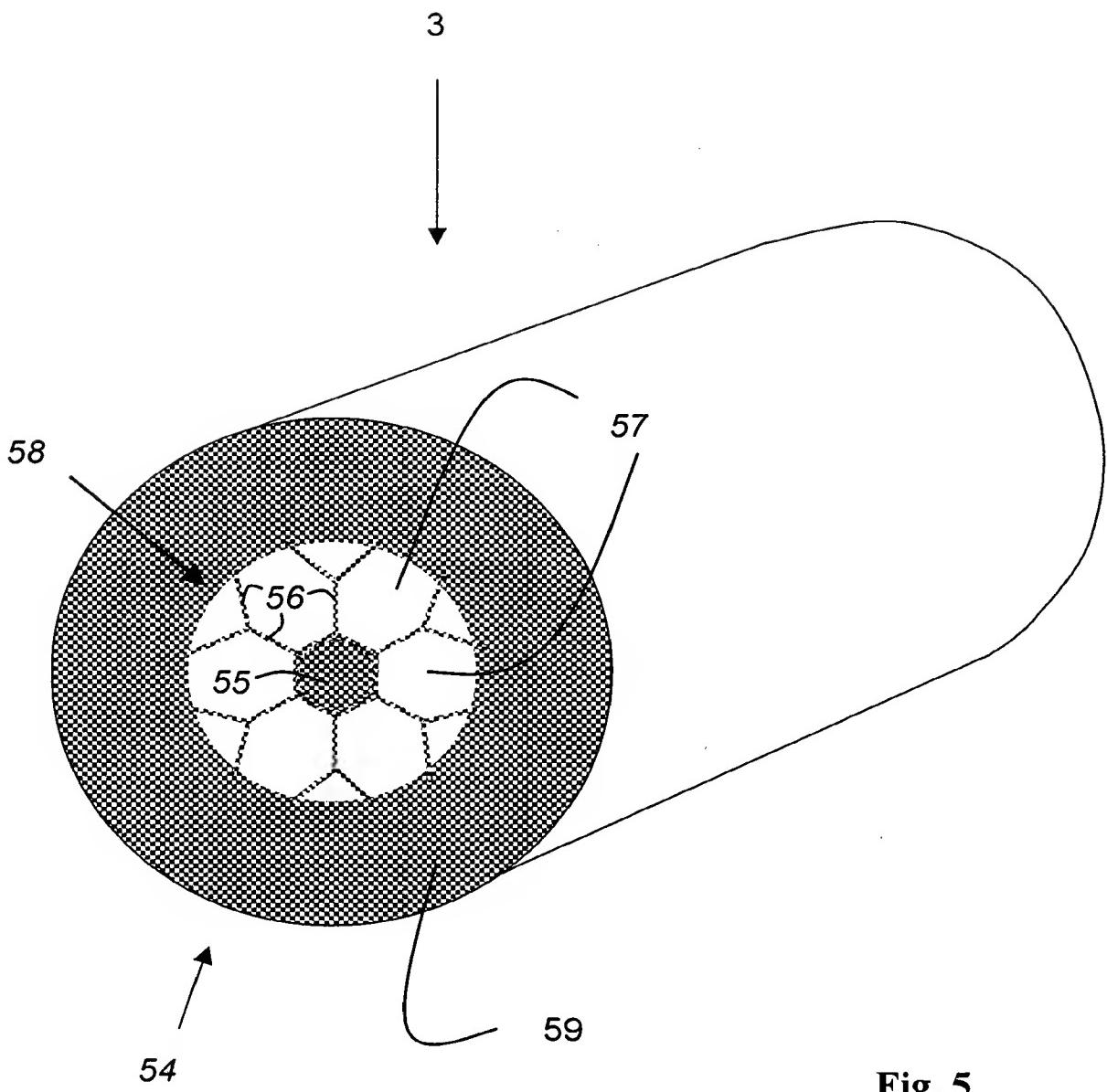


Fig. 5